

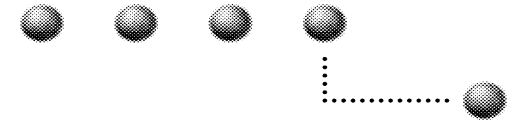
*Überarbeiteter und erweiterter Vortrag vom
Schweizer Maschinenelemente Kolloquium SMK 2010*

Statischer Festigkeitsnachweis von Schweissnähten mit örtlichen Spannungen nach FKM

Beat Schmied

Inhaltsverzeichnis

- 1. Einleitung / Definitionen*
- 2. Statischer Nachweis nach FKM
mit Strukturspannungen für flächenförmige Bauteile*
- 3. Ansatz Schmied für FKM-konformen Nachweis mit
Kerbspannungsmodellen*
- 4. Nachweis mit der grössten Hauptspannung
für volumenförmige Bauteile*
- 5. Beispiel*

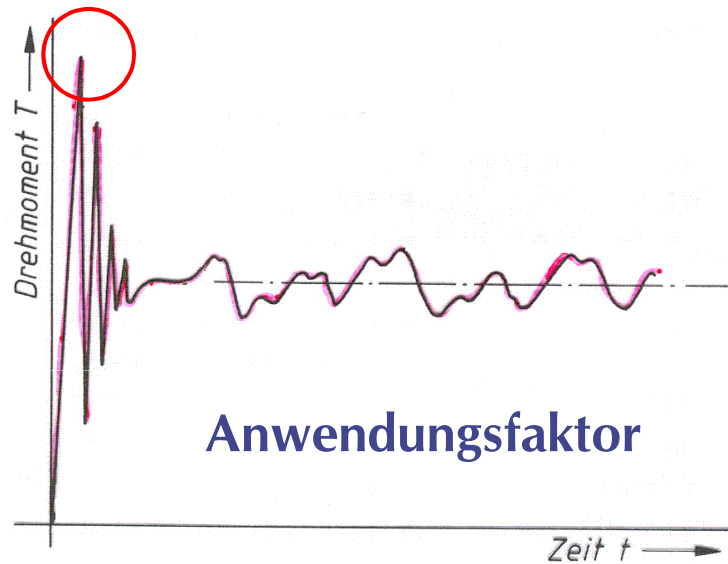


Einleitung / Definitionen

Einleitung

1. *Ist bei Schweissnähten vom statischen Nachweis die Rede, ist fast immer der Nachweis mit Nennspannungen gemeint (z.B. DIN 18800, EN 13445).*
2. *Die örtlichen Spannungen haben in der Praxis erst wenig Anwendung gefunden. Die FKM-Richtlinie bietet einen entsprechenden Ansatz.*
3. *In Kombination mit FE-Simulationen beinhaltet der aktuelle FKM-Ansatz aber Schwächen.*
4. *Für das CADFEM-Seminar „Schweissnahtberechnung“ erarbeitete Schmied Engineering ein angepasstes Vorgehen.*
5. *Im 2010 erschienen Forschungsbericht der FKM (Lit. 2) ist der statische Nachweis für Schweissnähte eines der Hauptthemen. Es ist deshalb zu erwarten, dass die nächste Ausgabe der FKM-Richtlinie diesbezüglich Verbesserungen bringt.*

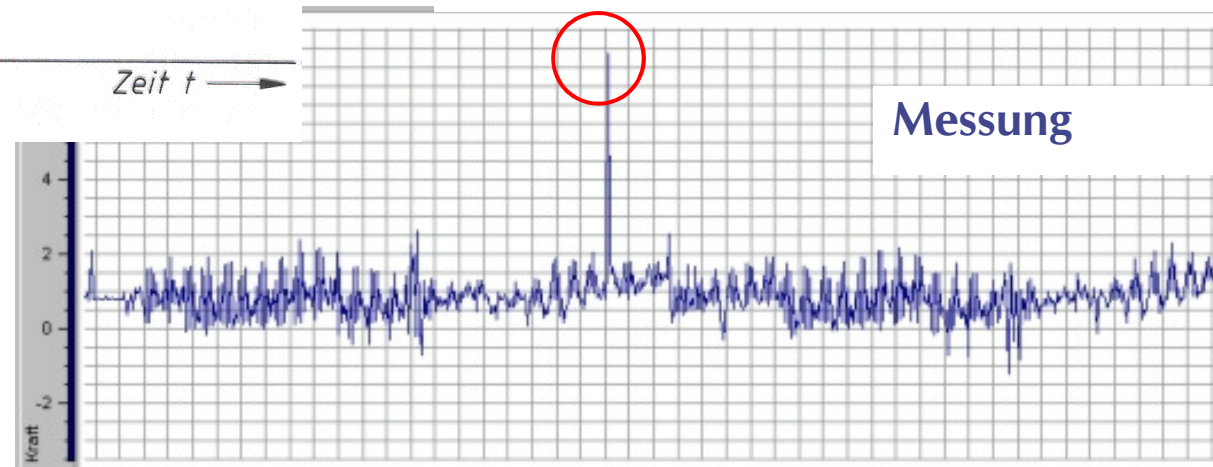
Statischer Nachweis \neq statische Belastung



Anwendungsfaktor

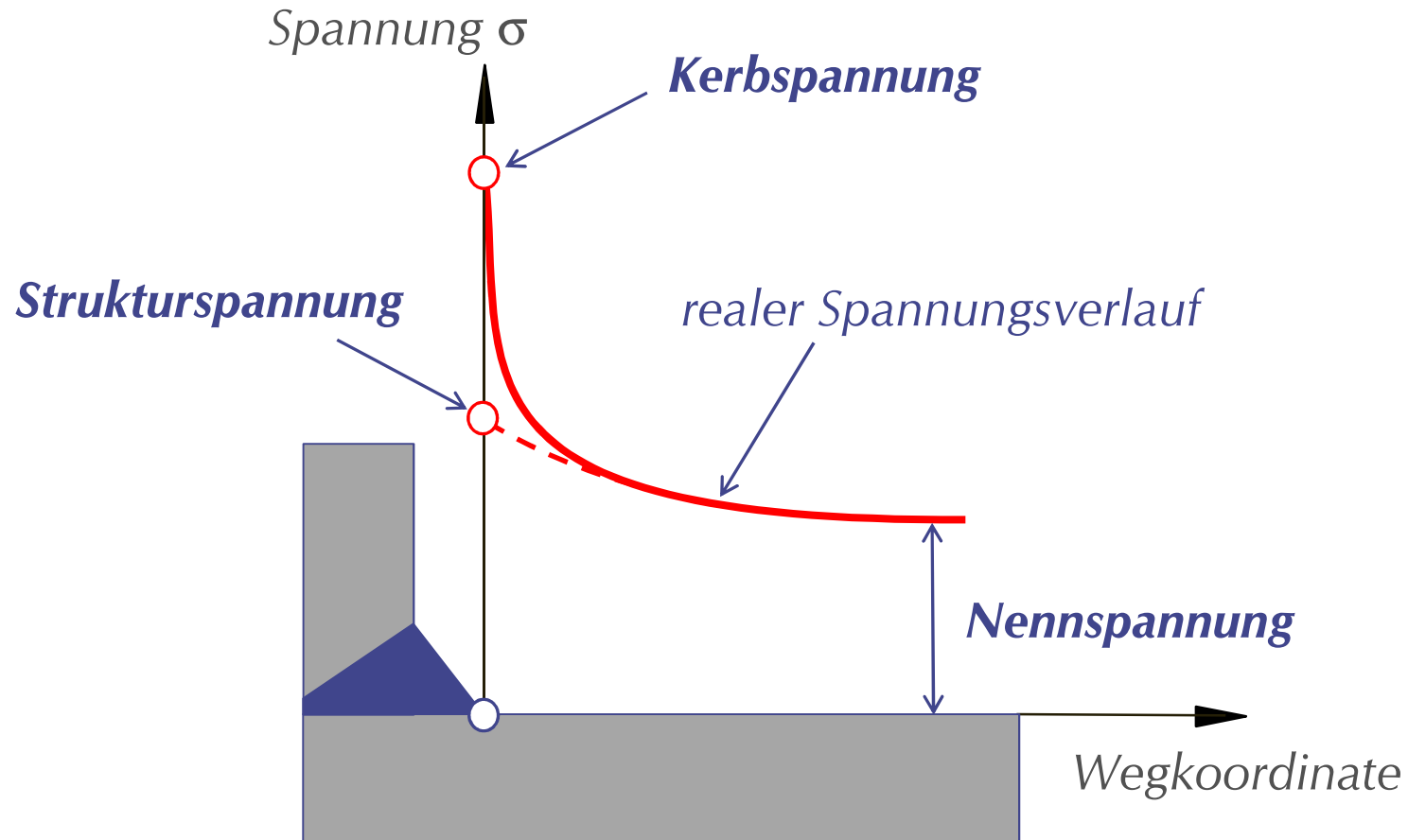
Spitzenbelastungen ohne Beeinträchtigung der Funktionsfähigkeit:

- meist hoch dynamisch
- seltene Ereignisse



Messung

Spannungsdefinitionen



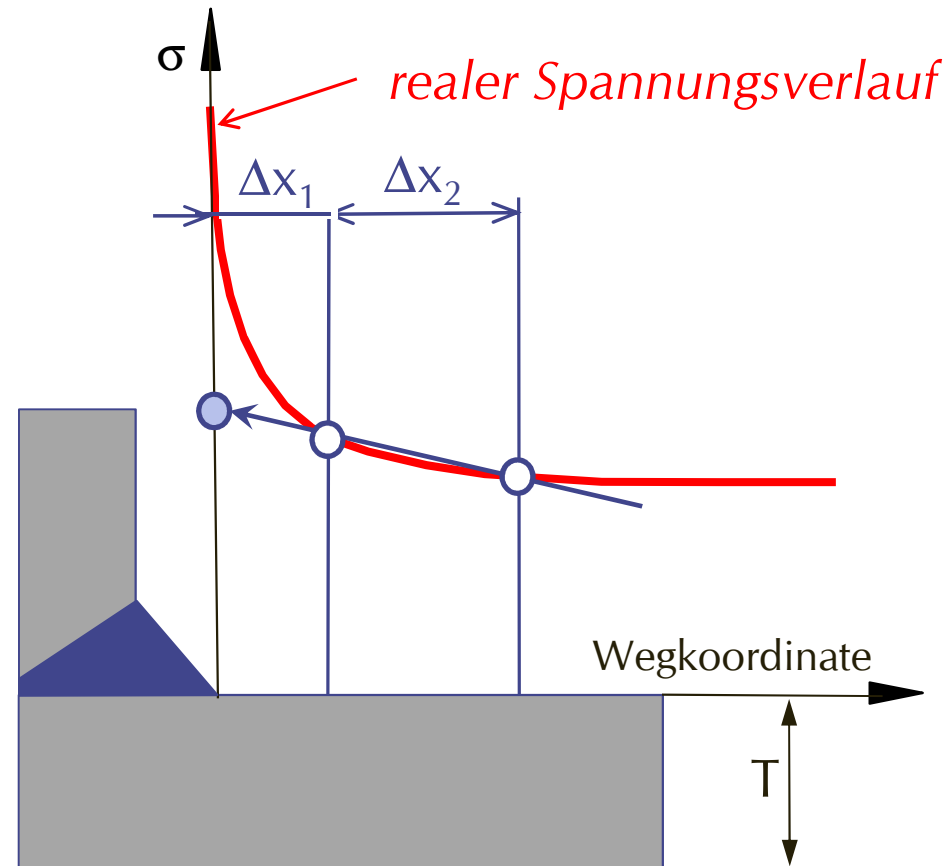
Strukturspannung - Hot-Spot-Methode

Extrapolation linear oder quadratisch

Verschiedene Regelwerke

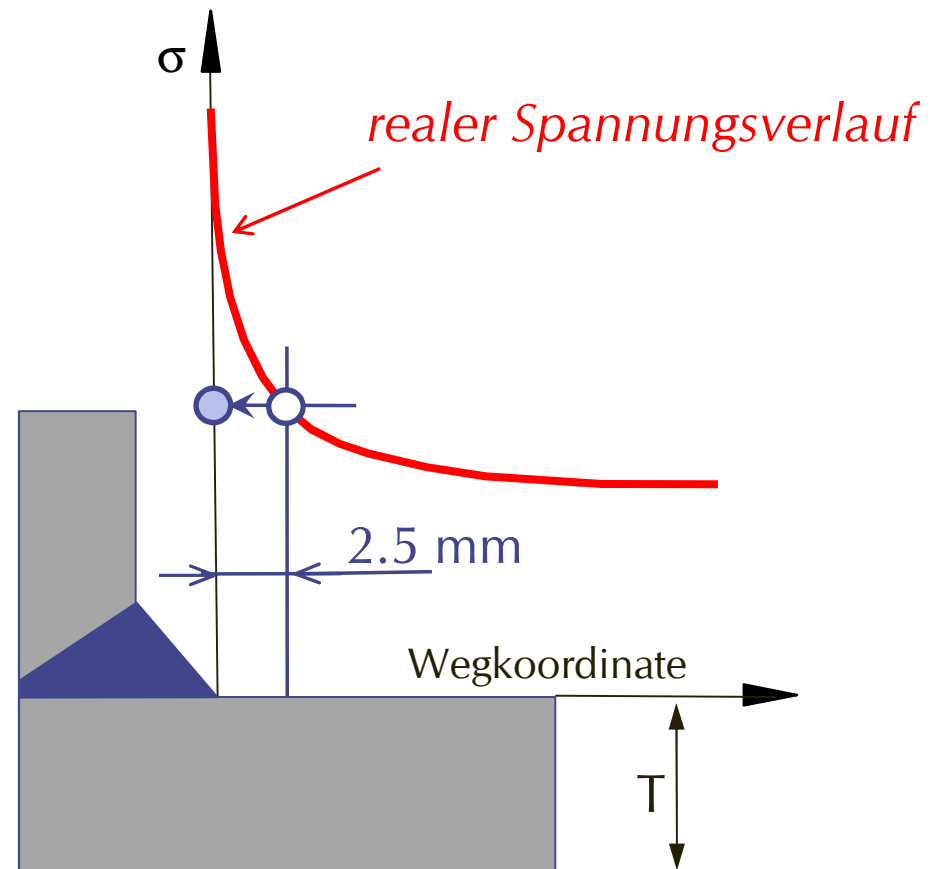
- IIW
- EN 13445
- Germanischer Lloyd
- u.a.

Die FKM basiert auf dieser Methode ohne sie vorzuschreiben.



Strukturspannung - Haibach

basiert eigentlich auf der
Dehnung (DMS)
in kein Regelwerk
aufgenommen
ideal zum Lokalisieren der
kritischen Bereiche



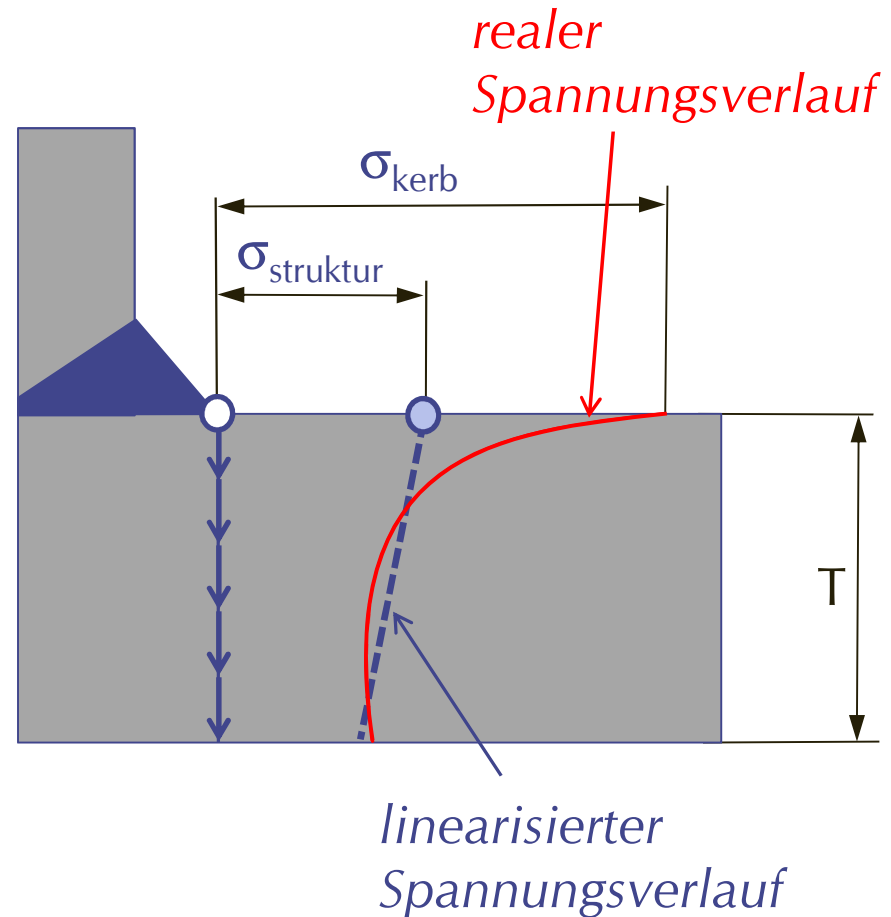
Strukturspannung - Innenlinearisierung

Zerlegung nach ASME in

- Membran-Anteil
- Biege-Anteil
- Kerb-Anteil

Varianten (z.B. Dong)
haben sich in der Praxis
(noch) nicht durchgesetzt.

$$\sigma_{struktur} = \sigma_m + \sigma_b$$



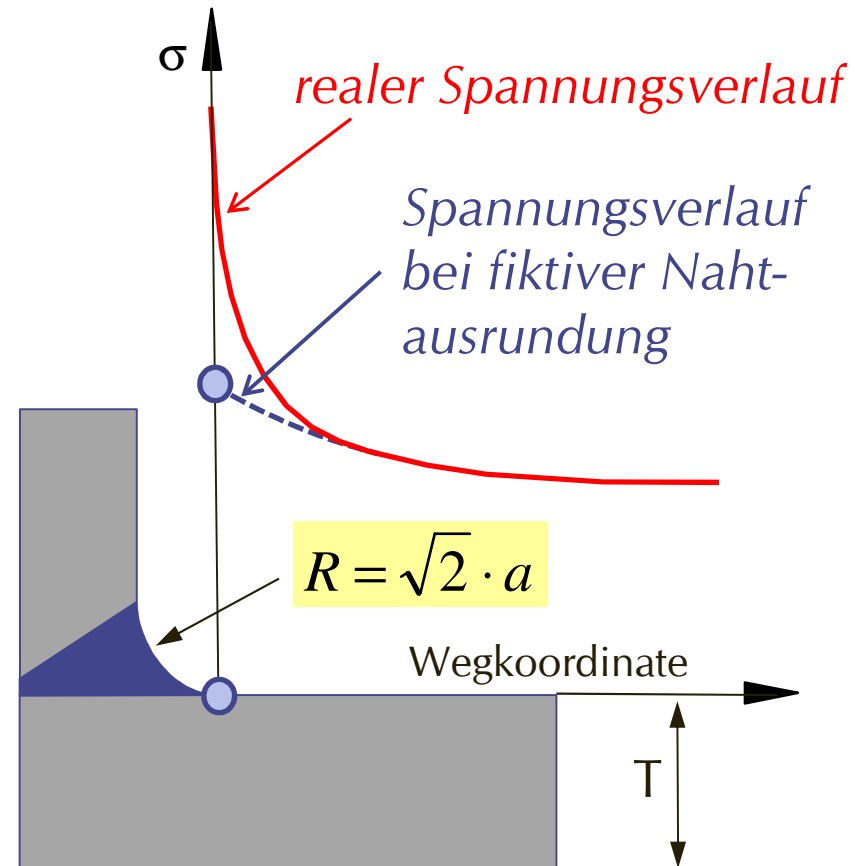
Strukturspannung - CAB

kerbfreie Modellierung der
Schweissnaht

Bisher in keinem Regelwerk
aufgenommen

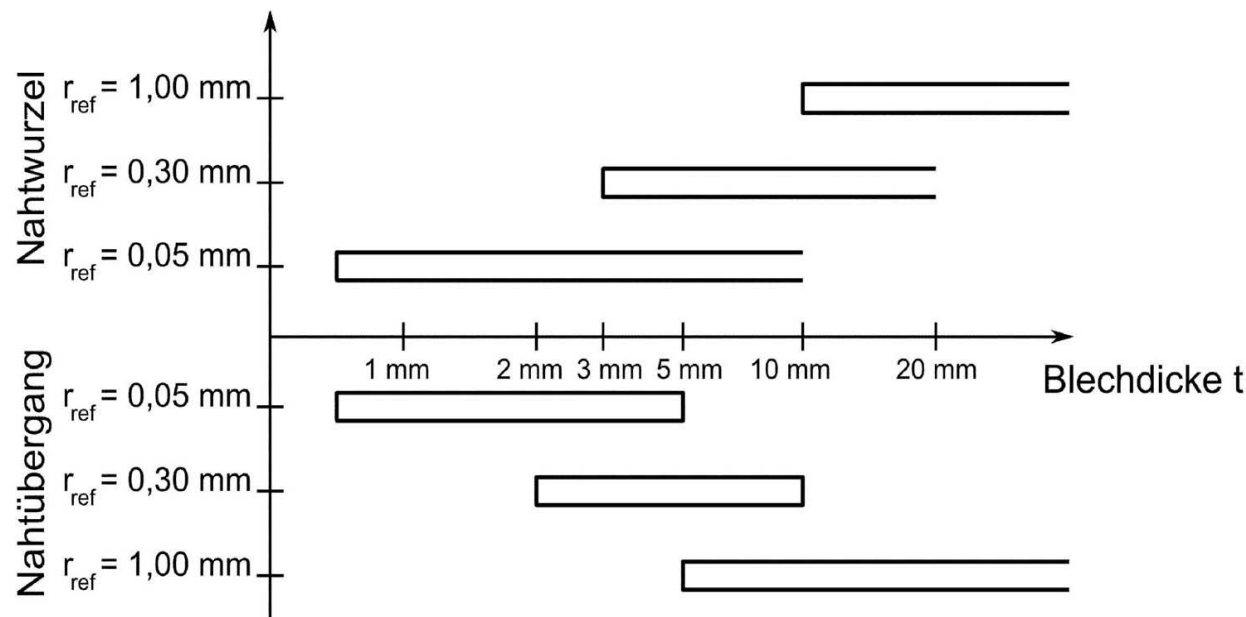
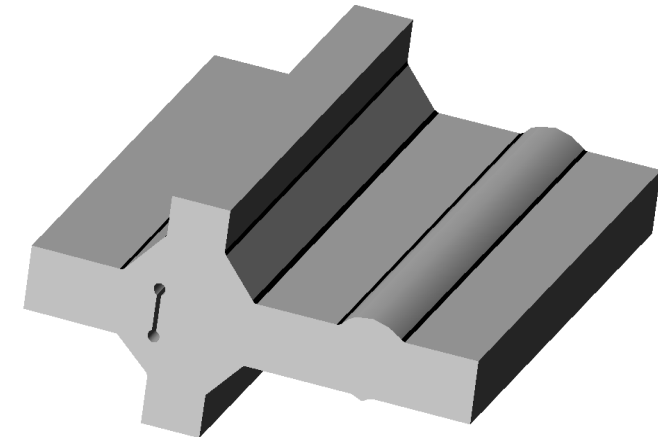
auf Kehlnähte limitiert

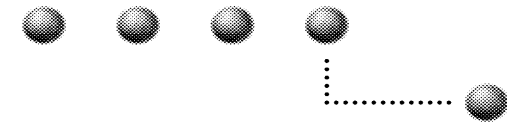
sehr einfache Auswertung



Kerbspannungskonzept

Die FKM definiert den klassischen Radius $R1$. Bei dünnen Blechen wird dadurch aber der Restquerschnitt verfälscht. In [Lit. 4] sind die **Referenzradien 0.05 und 0.3 mm** mit den zugehörigen FAT-Klassen definiert.





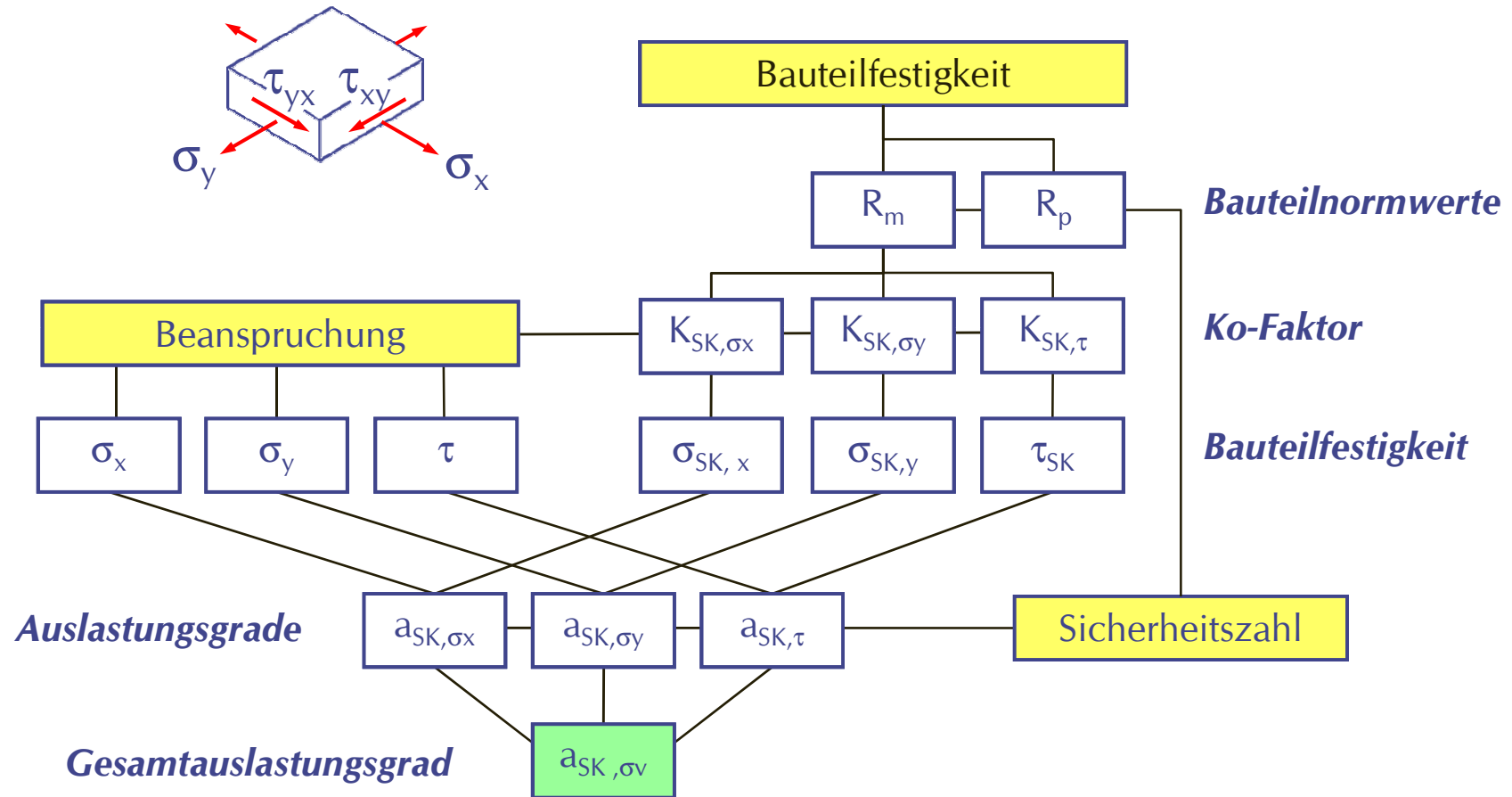
Statischer Nachweis mit örtlichen Spannungen nach FKM

Festlegungen der FKM

*Spannungsberechnung mit linear-elastischem Materialverhalten.
Der statische Nachweis von Schweißnähten ist mit Nenn- oder
Strukturspannungen, jedoch nicht mit Kerbspannungen zu führen.
Volumenförmige Bauteile sind wie flächenförmige zu behandeln.
Nahtübergänge werden wie ungeschweißte Bauteile beurteilt.
Für Nahtwurzeln ist eine eigene Nachweismethode definiert.
Schweißeigenstressungen werden vernachlässigt.*

	Nahtübergang	Nahtwurzel
Nennspannung	Übergangsquerschnitt	Nahtquerschnitt
Strukturspannung	Nahtübergang	Nahtwurzel
Kerbspannung	nicht definiert	

Ablauf für flächenförmige Bauteile



Konstruktionsfaktor K_{SK}

Nahtübergang

$$K_{SK,\sigma_x} = \frac{1}{n_{pl,\sigma_x}}$$

$$K_{SK,\sigma_y} = \frac{1}{n_{pl,\sigma_y}}$$

$$K_{SK,\tau} = 1$$

Nahtwurzel

$$K_{SK,\sigma_x} = \frac{1}{n_{pl,\sigma_x} \cdot \alpha_W}$$

$$K_{SK,\sigma_y} = \frac{1}{n_{pl,\sigma_y} \cdot \alpha_W}$$

$$K_{SK,\tau} = \frac{1}{\alpha_W}$$

Der **Schweissnahtfaktor** α_W ist von mehreren Faktoren abhängig:

Werkstoff

Zugfestigkeit

Nahttyp und Nahtform

Nahtqualität / Qualitätssicherung

Beanspruchungsart

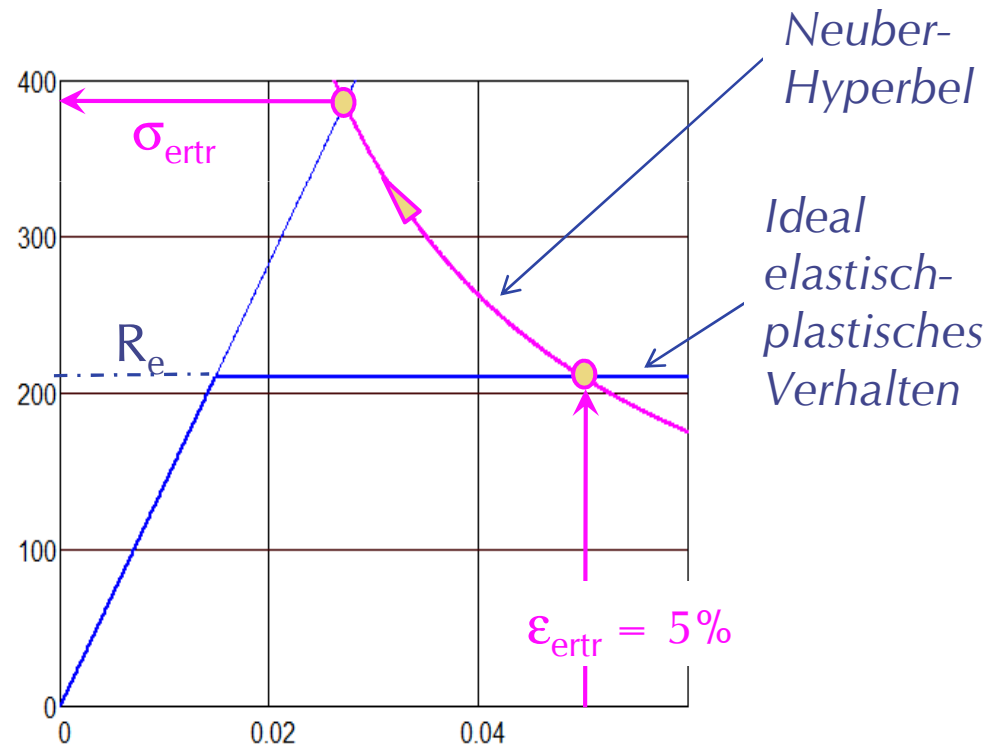
Plastische Stützzahl n_{pl}

Das Ausschöpfen der plastischen Tragreserven wird einerseits durch den Werkstoff (**örtliches Versagen**; K_w) und andererseits durch das Bauteil und die Belastung (**globales Versagen**; K_p) begrenzt.

$$n_{pl} = \min(K_p; K_w)$$

Die örtlich ertragbare Gesamtdehnung darf bei Stahl bis zu 5% betragen.

$$K_w = \sqrt{\frac{E \cdot \epsilon_{ertr}}{R_e}} = \sqrt{\frac{\sigma_{ertr}}{R_e}}$$



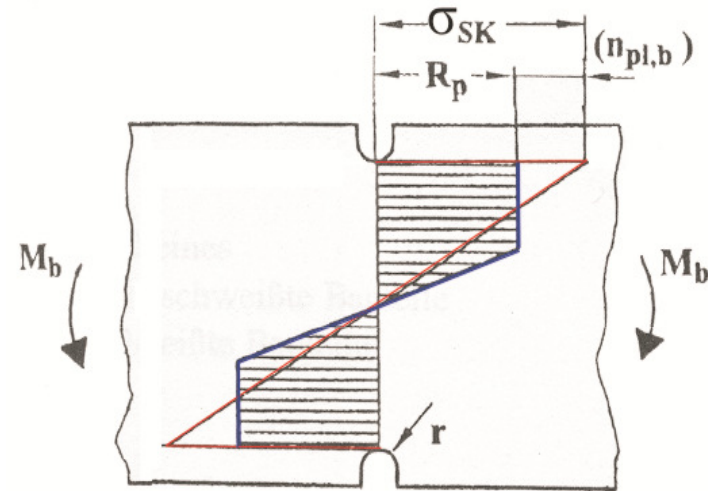
Plastische Formzahl K_p

Das globale Versagen tritt ein, sobald im Querschnitt der vollplastische Zustand erreicht wird.

$$K_p = \frac{\text{vollplastische Grenzlast}}{\text{elastische Grenzlast}}$$

Für den Nennspannungsnachweis sind die Formzahlen bekannt, z.B. 1.5 für Rechteckquerschnitt unter Biegebelastung.

Bei den Kerbspannungen ist die vollplastische Traglast iterativ mit einer elastisch-ideal-plastischen Spannungs-Dehnungskurve zu ermitteln.
Für die Strukturspannungen folgt ein Ansatz im nächsten Abschnitt.



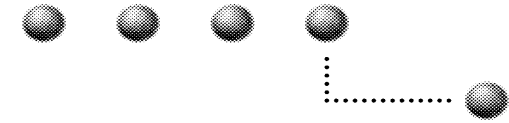
Besonderheit für Nahtwurzel

Für die Wurzel definiert die FKM eine spezielle Nachweisführung. Der grösste Unterschied besteht dabei bereits in der Spannungsberechnung. Für jede Lastart (Zug/Druck in X-Richtung, Zug/Druck in Y-Richtung und Schub) ist eine sogenannte Vergleichsstrukturspannung σ_{vw} zu bilden.

Mit den so gewonnenen Werten ($\sigma_{vw,x}$, $\sigma_{vw,y}$ und τ_{vw}) sind dann die Einzelspannungsnachweise zu führen. Für den Gesamtauslastungsgrad wird, wie vorhin gezeigt, noch einmal eine Hypothese angewendet.

Während die Lastarten (Zug, Biegung, Torsion) für stabförmige Bauteile und den Nennspannungsnachweis noch plausibel sind, wird es bei anspruchsvolleren Strukturen schwierig, wenn nicht sogar unmöglich, sie eindeutig zu definieren, respektive auseinander zu halten.

Für FE-Simulationen ist diese Definition kaum praktikabel.

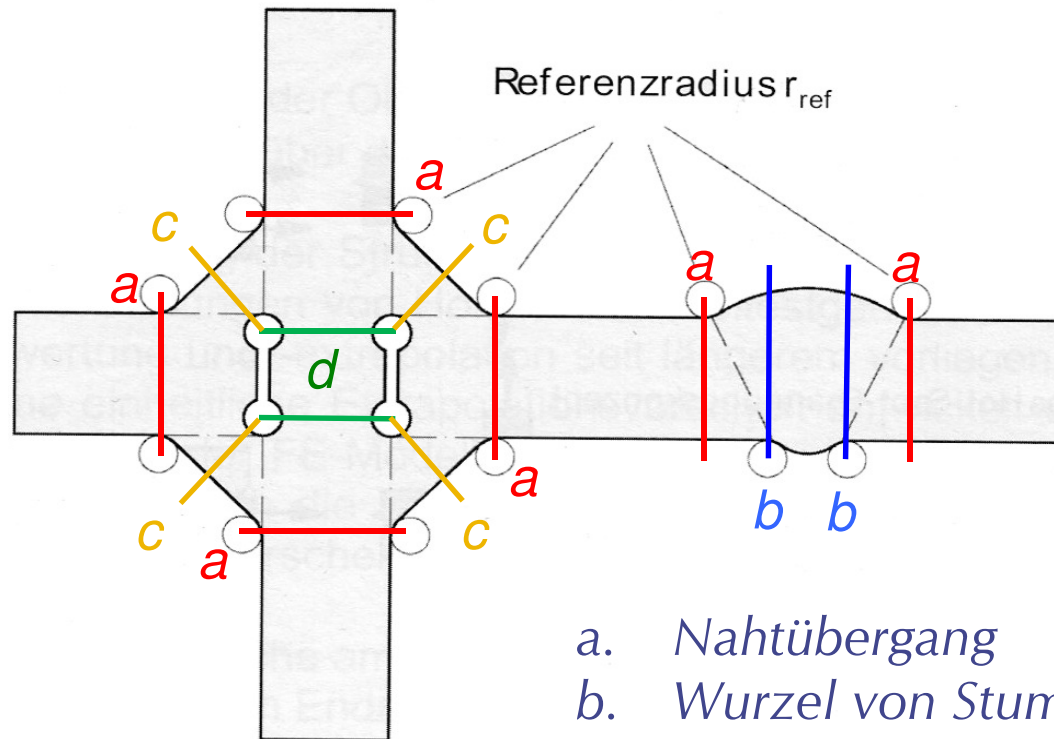


Ansatz Schmied für Kerbspannungsmodelle

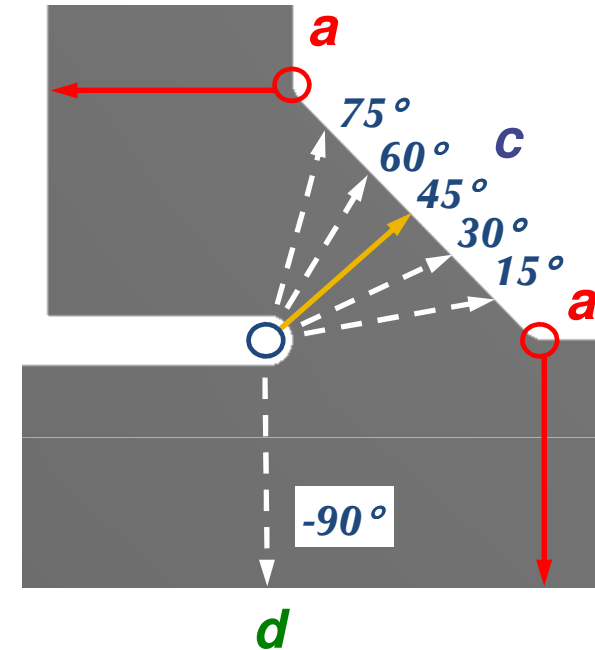
Grundsätze

1. *Aus dem Kerbspannungsmodell für den Ermüdungsnachweis sind auch alle relevanten Parameter für den Strukturspannungsnachweis zu generieren.*
2. *Für Nahtübergang und Wurzel werden die Strukturspannungen mit der Innenlinearisierung gewonnen.*
3. *Der Auswertepfad wird an die Stelle mit der grössten Hauptspannung positioniert.*
4. *Die plastische Formzahl wird für die Strukturspannung ermittelt.*
5. *Der FKM-Ansatz für die Nahtwurzel mit der Strukturvergleichsspannung pro Lastart wird NICHT angewendet.*

Linearisierungspfad im Kerbspannungsmodell

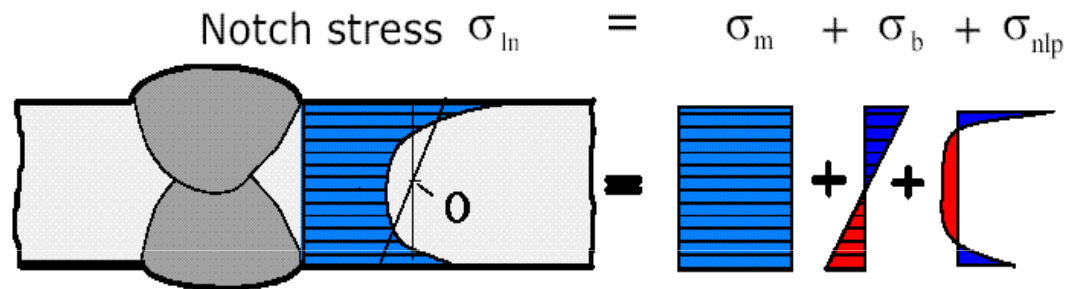


- a. Nahtübergang
- b. Wurzel von Stumpfnah
- c. Wurzel von Kehlnah
- d. Wurzel von Kehlnah (unbelastetes Anschweißteil)



Parameter für den Nachweis

Da der Nachweis für flächenförmige Bauteile zu führen ist, muss jede der drei Spannungskomponenten im Nachweispunkt linearisiert werden.



Normalspannungen σ_x und σ_y

$$\sigma_{struktur} = \sigma_m + \sigma_b$$

$$K_{p,\sigma} = \frac{\sigma_m + 1.5 \cdot \sigma_b}{\sigma_{struktur}} \leq 1.5$$

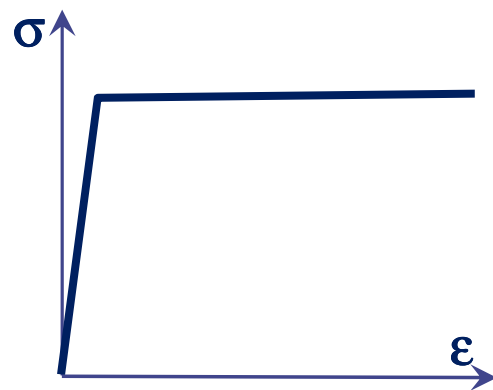
Schubspannung τ_{xy}

$$\tau_{struktur} = \tau_m + \tau_b$$

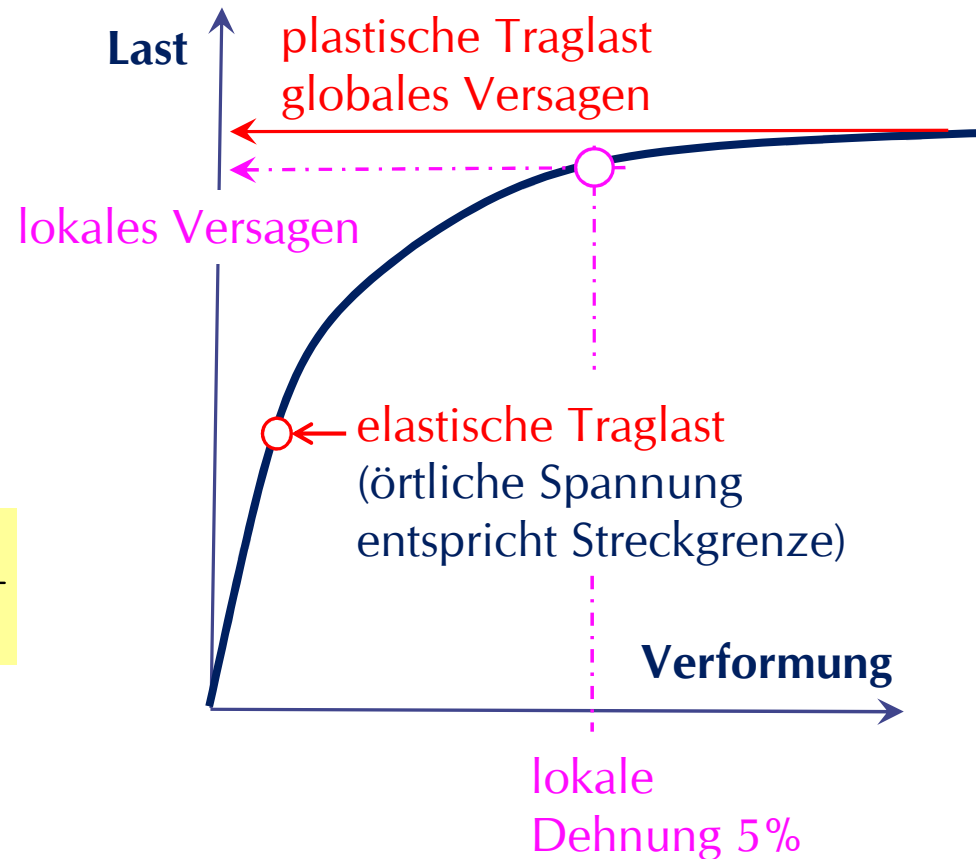
$$K_{p,\tau} = 1$$

Plastische Formzahl für Kerbspannung

An 4 Nahtdetails wurde der vorherige Ansatz mit der ideal-elastisch-plastischen FE-Simulation verglichen.

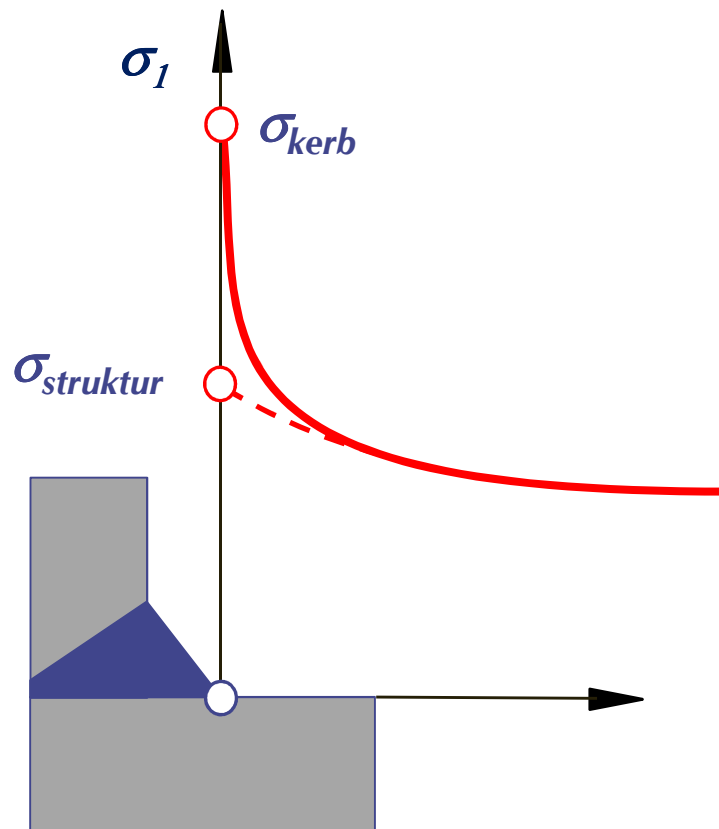


$$K_{p,FE} = \frac{\text{plastische Traglast}}{\text{elastische Traglast}}$$



Überprüfung der plastischen Formzahl

Für den Vergleich mit der FE-Simulation ist die plastische Formzahl der Strukturspannung mit der Kerbformzahl zu multiplizieren.

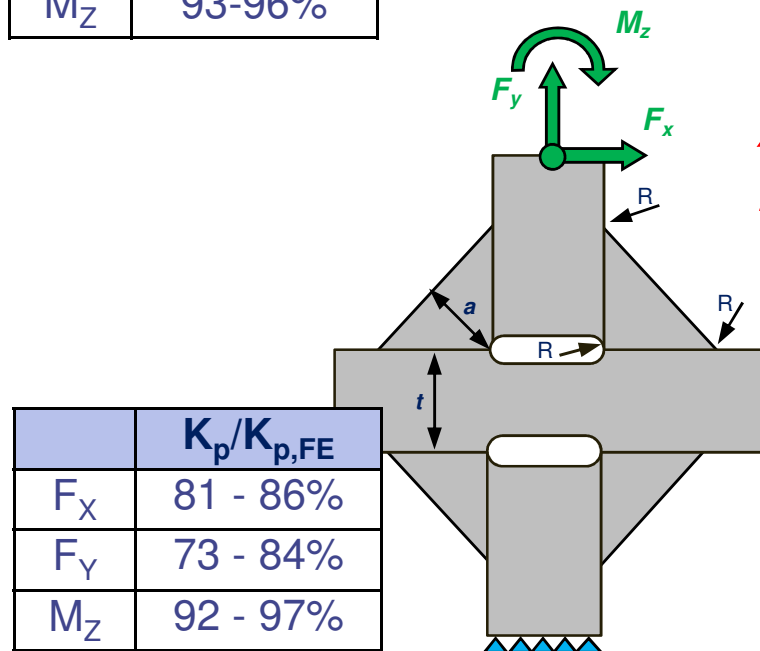
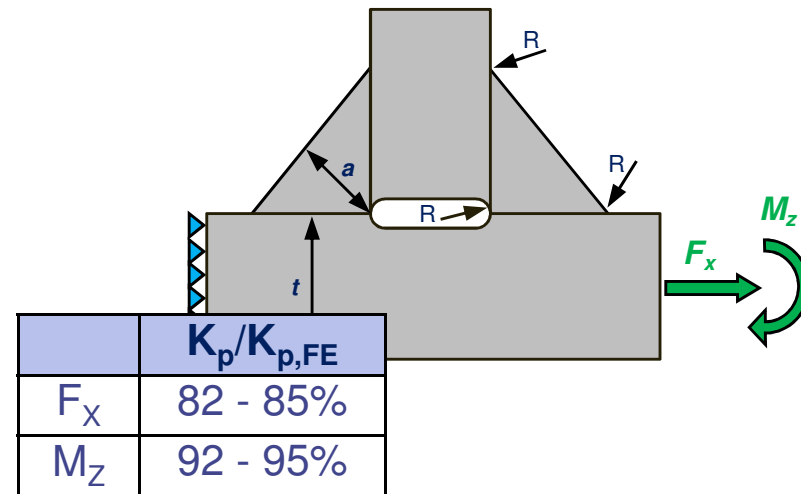
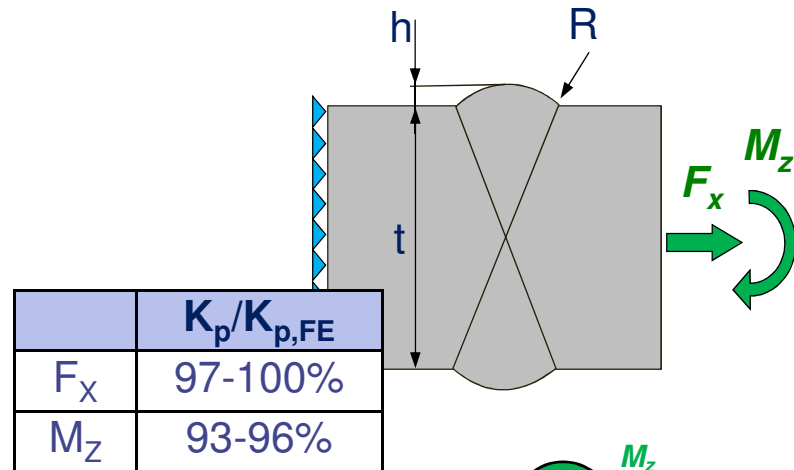


$$K_{p,\sigma} = \frac{\sigma_m + 1.5 \cdot \sigma_b}{\sigma_{struktur}} \leq 1.5$$

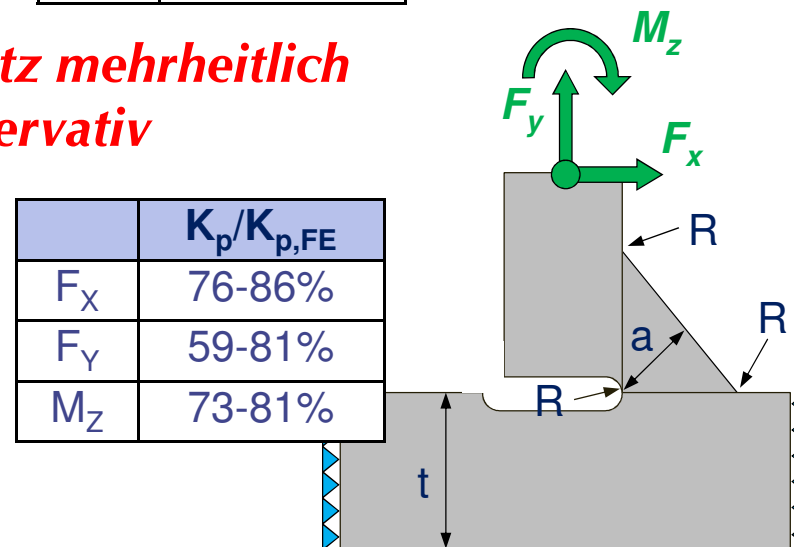
$$K_t = \frac{\sigma_{kerb}}{\sigma_{struktur}}$$

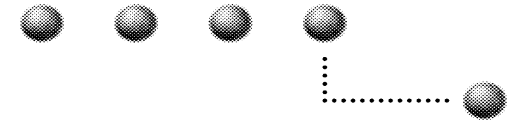
$$K_p = K_{p,\sigma} \cdot K_t$$

Vergleich mit elastisch-plastischer Rechnung



Ansatz mehrheitlich konservativ



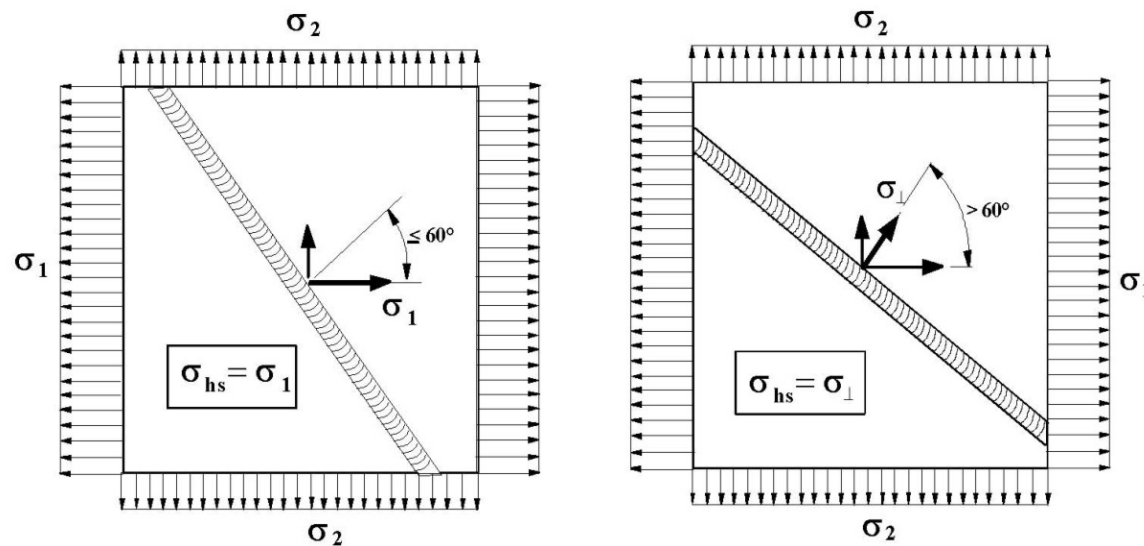


***Nachweis mit der
größten Hauptspannung
für volumenförmige Bauteile***

Nachweis für volumenförmige Bauteile

Bei der Ermüdung lässt die FKM die Möglichkeit offen, den Nachweis für volumenförmige Bauteile und damit mit den Hauptspannungen zu führen.

Da für geschweißte, volumenförmige Bauteile die Normalspannungshypothese vorgegeben wird, ist bloß die betragsmäßig größte Hauptspannung von Bedeutung **vereinfachte Nachweisführung.**

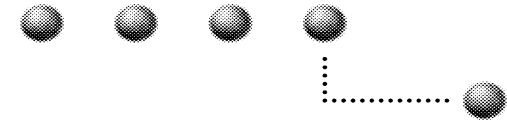


Nach IIW ist in einem sehr weiten Rahmen die größte Hauptspannung zu verwenden.

Vergleich der Nachweisführungen

An vier Nahtdetails wurden die Nachweise mit den Spannungskomponenten und mit der größten Hauptspannung geführt.

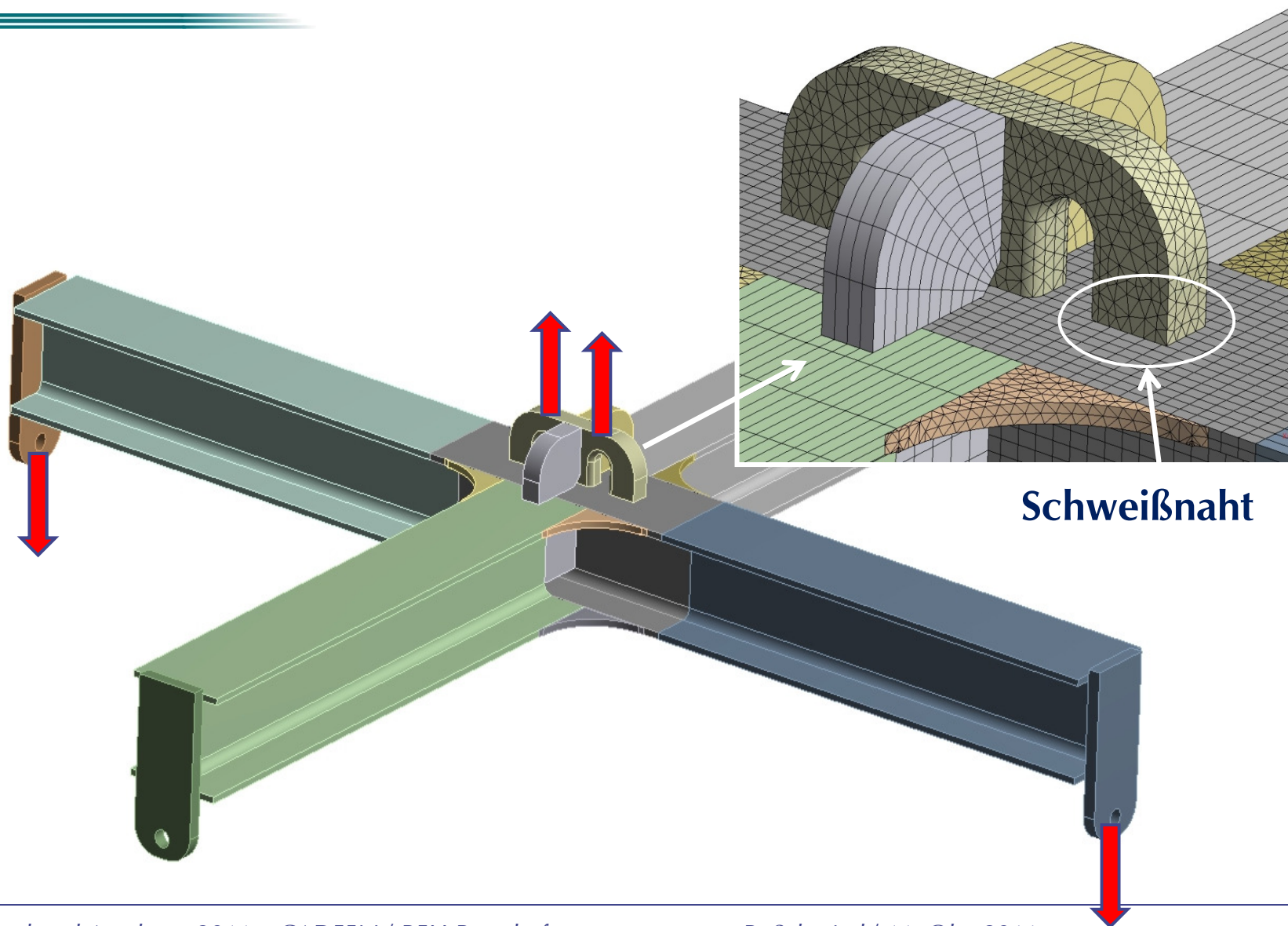
Modell & Belastung		Übergang	Wurzel
		$a_{SK, \sigma_1} / a_{SK, FKM}$	$a_{SK, \sigma_1} / a_{SK, FKM}$
M1	F_x	98 - 100%	-
	M_z	105 - 108%	-
M2	F_x	104 - 107%	72 - 74%
	M_z	-	-
M3	F_x	✓	✗
	F_y		
	M_z	105 - 109%	80 - 92%
M4	F_x	109 - 113%	65 - 74%
	F_y	92 - 94%	81 - 83%
	M_z	109 - 112%	42 - 55%



Beispiel

Beispiel

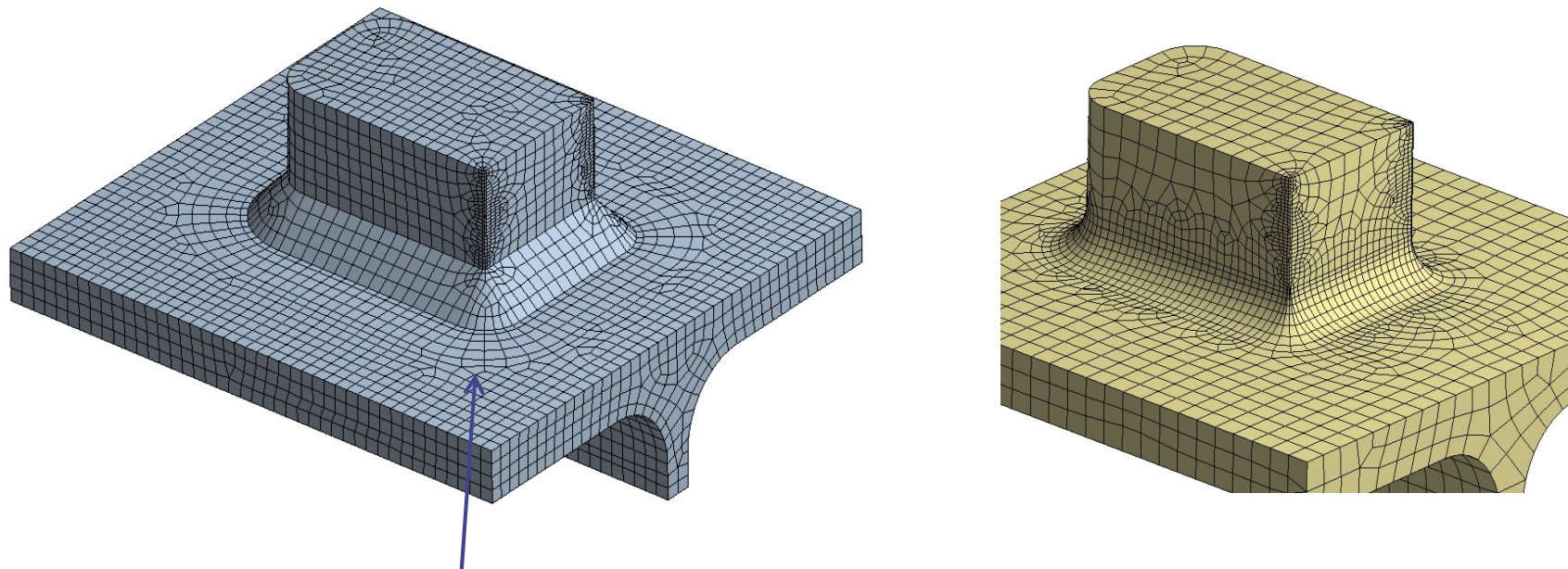
Kreuztraverse



Beispiel

Submodelle für Nahtübergang

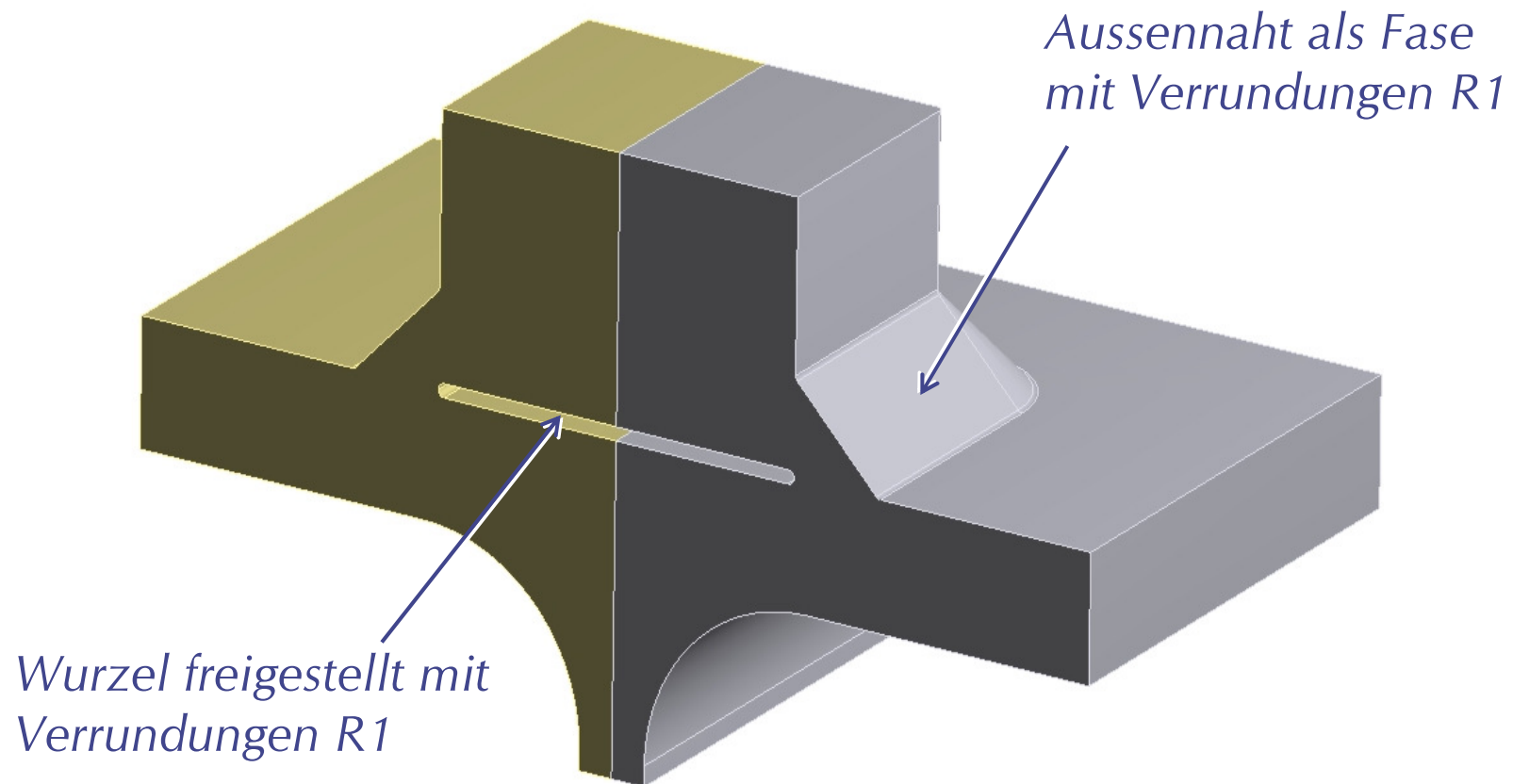
Im Gesamtmodell sind alle Bauteile im Verbundkontakt. Erst im Submodell werden die Teile verschmolzen und die Kehlnähte modelliert.



Prägungen für **Haibach** und **Hot-Spot-Extrapolation** zur besseren Steuerung der lokalen Vernetzung.

Beispiel

Kerbspannungsmodell mit Wurzel



Vergleich der Auslastungsgrade

Beim Nahtübergang ergibt der Nachweis mit der größten Hauptspannung tendenzmäßig leicht konservativere Werte. Bei der Wurzel ist es jedoch wiederum umgekehrt.

Nahtübergang	$a_{SK,FKM}$	$a_{SK,\sigma 1}$
Haibach	78.2%	79.0%
Innenlinearisierung	76.4%	85.4%
CAB	75.3%	76.2%
Hot-Spot	66.6%	67.1%

Nahtwurzel	$a_{SK,FKM}$	$a_{SK,\sigma 1}$
Schmied	64.7%	60.3%

Abschluss

Besten Dank für die Aufmerksamkeit

Zur Person

Maschineningenieur FH

Dozent an der Berner Fachhochschule für Festigkeitslehre und FEM

Referent bei CADFEM in CH, D und A

für das Seminar „Festigkeitsnachweise von Schweissnähten“

!!! nächstes Seminar in Aadorf 16-18. November !!!

Zur Firma

Spezialisiert auf Festigkeitsberechnungen aller Art

Bürogemeinschaft mit Büro Mittelland der CADFEM Schweiz

Software im Einsatz: FE-Programm ANSYS, KISSsoft, MDESIGN u.a.

www.schmied-engineering.ch